中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 200−210

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160530

王利立, 朱永永, 赵彦华, 殷文, 柴强. 施氮和根间互作对密植大麦间作豌豆氮素利用的协同效应[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 200−210

Wang L L, Zhu Y Y, Zhao Y H, Yin W, Chai Q. Response of nitrogen utilization to root interaction and plant density in barley-pea intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 200−210

施氮和根间互作对密植大麦间作豌豆氮素利用的协同效应*

王利立[1,2], 朱永永[3], 赵彦华[1,4], 殷 文[1,2], 柴 强[1,2**]

(1. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070; 3. 甘肃省农业技术推广总站 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070)

摘 要: 针对禾豆间作密植机理研究薄弱问题, 以大麦间作豌豆为研究对象, 设施氮[不施氮: 0 mg(N)·kg^{-1}(土); 施氮: 100 mg(N)·kg^{-1}(土)]、隔根(不隔根、隔根)和密度[低密度: 15 株(大麦)·盆$^{-1}$; 高密度: 25 株(大麦)·盆$^{-1}$] 3个参试因子, 通过盆栽试验探讨了施氮和根系分隔对密植间作群体氮素竞争互补关系和利用效率的影响, 以期为禾豆间作密植和氮素高效利用提供调控依据。结果表明: 1)施氮、根间互作和增加大麦密度均可提高大麦||豌豆间作群体的吸氮量, 其中施氮较不施氮处理提高 33.8%, 不隔根处理较隔根处理提高 81.1%, 高密度较低密度处理提高 4.2%; 根间互作在低氮条件下对间作吸氮量的贡献相对较高, 不施氮和施氮条件下, 根间互作提高间作吸氮量的比例分别为 92.4%和 11.0%; 根间互作条件下增大大麦种植密度可显著提高间作群体吸氮量。2)大麦为氮素竞争优势种, 密植使大麦氮素竞争比率显著提高, 施氮能弱化大麦氮素竞争比率, 抽穗期大麦相对于豌豆的氮素竞争优势达到最大值。3)根间互作使大麦、豌豆籽粒氮含量在施氮条件下分别提高 126.7%、26.9%, 不施氮时分别提高 188.5%、46.5%, 且施氮水平和根间作用方式对间作籽粒氮含量有显著的交互作用。4)高密度大麦和根间互作可显著提高间作群体的氮肥利用率, 根间互作条件下增加大麦密度使间作群体氮肥利用率提高 59.8%; 大麦相对于豌豆的氮素竞争比率与间作群体氮肥利用率呈显著正相关关系。本研究表明, 施氮、根间作用与大麦密度对大麦||豌豆间作氮素利用呈显著的交互作用, 适宜的施氮量和充分的根间作用是支撑间作密植、优化种间对氮素的竞争关系, 最终提高群体吸氮量和氮肥利用率的重要途径。

关键词: 大麦间作豌豆系统; 根间互作; 施氮量; 吸氮量; 氮肥利用率; 氮素竞争比率

中图分类号: S314; S344.2; S512.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0200-11

Response of nitrogen utilization to root interaction and plant density in barley-pea intercropping system*

WANG Lili[1,2], ZHU Yongyong[3], ZHAO Yanhua[1,4], YIN Wen[1,2], CHAI Qiang[1,2**]

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Agro-technology Extension Station, Lanzhou 730070, China; 4. College of Resources & Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To investigate the mechanism of high planting density in cereal-legume intercropping system, a pot experiment of

* 国家自然科学基金项目(31160265, 31360323)和甘肃农业大学"伏羲杰出人才培育计划"资助
** 通讯作者: 柴强, 主要从事多熟种植、节水农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
王利立, 主要从事多熟种植研究。E-mail: wll@gsau.edu.cn
收稿日期: 2016-06-10 接受日期: 2016-10-04
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31160265, 31360323), and the Outstanding Talent Culture Project of Gansu Agriculture University.
** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
Received Jun. 10, 2016; accepted Oct. 4, 2016

barley-pea intercropping system was carried out and the effects of nitrogen (N) application and root barrier on nitrogen and fertilizer use efficiency under high planting density of barley were determined. In the experiment, three factors, each with two treatment levels — N fertilizer application [no N application and N application with 100 mg(N)·kg^{-1}], root barrier [no barrier with root interaction and root barrier without root interaction) and planting density (low density with 15 barley plants per pot and high density with 25 barley plants per pot) were set up. The results showed that: 1) N application, plant root interaction and high barley planting density improved N uptake of barley-pea intercropping system. Compared with no N application treatment, N uptake increased by 33.8% in N application treatment. There was also 81.1% increase in N uptake under no root barrier treatment over root barrier treatment. N uptake under high planting density treatment increased by 4.2% compared with low planting density treatment. Plant root interaction improved N uptake by 92.4% and 11.0%, respectively, under no N application and N application treatments. Increasing planting density with root interaction significantly increased N uptake of the intercropping system. 2) Barely plant performed better for N competition, and its' N competition ratio significantly increased under high planting density. However, N application reduced barley N competition ratio. Compared with pea, barley was highest in competitive advantage at heading stage. 3) Root interaction improved grain N content of barley and pea, respectively, by 126.7% and 26.9% under N application treatment. Also barley and pea kernel N content increased, respectively, by 188.5% and 46.5% under no N treatment. There was a significant interaction between N application and root interaction for kernel N content. 4) High barley planting density significantly improved N use efficiency by 59.8% under root interaction treatment of the intercropping system. N competition between barley and pea was positively correlated with N use efficiency in the intercropping plant population. In conclusion, interactions of N application, root barrier and barley planting density enhanced crop productivity of barley-pea intercropping system. Proper N application and sufficient root interaction made feasible high planting density intercropping system, optimized competition between barley and pea, and improved N uptake and use efficiency.

Keywords: Barley-pea intercropping; Root interaction; Nitrogen application amount; Nitrogen uptake; Nitrogen use efficiency; Nitrogen competition ratio

间作是典型的资源高效型种植模式，该模式利用不同作物空间生态位、营养生态位的互补[1-2]，实现了光、水分、养分等资源的高效利用，形成了高产的基础[3-4]。不同类型的间作模式中，禾豆间作(禾本科||豆科作物间作)可在一定程度上促进豆科固氮并提高共生作物的氮素利用效率[5-7]，减少土壤无机氮累积，降低农田氮素污染风险，有利于农田生态环境保护，被认为是未来可持续农业发展的重要方向之一[8-9]。

研究表明，禾豆间作氮素高效利用特征主要源自种间的氮素互补利用[10-11]，而施氮水平[11]、作物密度[12-13]是调控种间关系的常见措施。焦念元等[11]研究发现，施氮能够促进玉米(*Zea mays* L.)间作花生(*Arachis hypogaea* L.)的氮累积量，但间作优势随施氮量的增加而降低。植物所需的氮素绝大部分来自于土壤，而土壤养分是通过根系吸收的，提高根系吸收利用土壤氮素能力对于提高作物产量和氮素利用效率具有重要意义[12]。禾豆间作群体内，不同作物对土壤氮素的竞争互补利用、氮阻遏消减和氮转移[1]等调控氮素利用的生理、生态学过程，很大程度上依赖于根间互作。生产实践中，往往通过种植密度对间作中组分作物的种间关系进行调控。间作作物种植密度对竞争和补偿的影响主要取决于生长资源的丰缺和作物的物候学特征[13]，在资源充足时竞争相对较小而补偿效应较大，而资源量不足时竞争加剧而补偿弱化[14]。随耐密作物品种更新和管理技术的不断优化，通过密植进一步增产、增效是间作未来的重点开发方向[13,15]。研究集成应用施肥、地下互作优化与密植综合配置、协同提高禾豆间作生产效率的理论，对通过农田栽培技术进一步增强禾豆间作氮素利用优势和禾豆高效间作种植模式的广泛应用提供可靠的理论支撑和实践依据。

不同禾豆间作模式中，大麦(*Hordeum vulgare* L.)||豌豆(*Pisum sativum* L.)间作共生期超过总生育期的 80%，互作时间长，是研究禾豆间作体系氮素营养竞争和互补的理想模式[6]。因此，本研究选择大麦||豌豆间作为参试模式，在不同施氮水平下，集成应用能够区分地下、地上互作作用的根系分隔研究方法[1,16-17]，探讨根间作用与施氮量对密植间作群体氮素竞争互补利用的影响，以期为调控密植导致的资源竞争变化、提高禾豆间作资源利用效率提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于2012年3—7月和2013年3—7月在兰州(36°03′N，103°40′E)甘肃农业大学日光温室进行，盆栽试验(瓦氏盆高45 cm，直径30 cm)。供试土壤为黏

壤土，取自兰州市永登县秦王川下家井，前作为大麦，土壤含有机质12.9 $g\cdot kg^{-1}$、铵态氮2.9 $mg\cdot kg^{-1}$、硝态氮 5.0 $mg\cdot kg^{-1}$、全磷0.4 $g\cdot kg^{-1}$、速效磷 0.1 $g\cdot kg^{-1}$。供试土壤风干后过2 mm筛，所有肥料作为基肥一次性施入，播前将土壤与肥料混匀，每盆装土15 kg。

施磷量为0.1 $g(P_2O_5)\cdot kg^{-1}$(土)，用化学纯KH_2PO_4折算施入；氮肥为化学纯尿素(含N 46%)。供试大麦品种'甘啤4号'，豌豆品种'陇豌1号'，均由甘肃省农业科学院提供。

试验参试模式为大麦||豌豆间作，设不施氮[N_0, 0 $mg(N)\cdot kg^{-1}$(土)]和施氮[N_1, 100 $mg(N)\cdot kg^{-1}$(土)]2个N水平；根间不分隔和根间分隔(P，厚0.025 mm塑料布完全分隔)2种根间作用方式；间作大麦设每盆15株(D_1，低)、25株(D_2，高)2个密度水平；间作豌豆密度均为每盆15株。共组成8个处理，每处理重复3次。两种作物分别占试验瓦氏盆的一半。

两年试验中，大麦于3月3日、豌豆于4月1日播种，大麦收获期分别为7月14日和7月15日，豌豆收获期分别为7月2日、7月1日。

1.2 测定指标和方法

作物吸氮量：豌豆出苗20 d开始对大麦和豌豆同时取样测定，共取样4次，前3次采样每次间隔20 d(分别在大麦苗期、拔节期和抽穗期)，第4次采样为成熟期。每处理每次采样3盆，样品于105 ℃下杀青，80 ℃恒温烘干，测定作物干物重，用凯氏定氮法[16]分别测定大麦和豌豆籽粒、秸秆和植株全氮含量。

作物吸氮量=作物干物重×植株含氮量 (1)

大麦相对于豌豆的营养竞争比率(NCR_{BP})[1]:

$$NCR_{BP}=(N_{iB}/N_{sB})-(N_{iP}/N_{SP}) \quad (2)$$

式中：N_{iB}、N_{iP}分别代表大麦、豌豆在根系不分隔时的吸氮量，N_{sB}、N_{sP}分别代表大麦、豌豆在根系分隔时的吸氮量。当 $NCR_{BP}>0$ 时表明大麦比豌豆对氮的营养竞争能力强；当 $NCR_{BP}<0$ 时则相反。

氮素收获指数(NHI)计算公式为：

NHI=籽粒吸氮量/地上部吸氮量 (3)

氮素收获指数用于量化作物生长后期干物质由叶片和茎秆向籽粒中转移程度，可判断作物氮素利用能力。

氮肥利用率[17](NUE)计算公式为：

NUE=(施氮处理地上部吸氮量−不施氮处理地上部吸氮量)/施氮量 (4)

氮肥利用率用于衡量化学氮肥被当季作物吸收利用的百分率[18]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件整理数据，SPSS 17.0 软件进行数据的统计与相关分析，运用 Duncan's 多重比较法对不同处理结果进行分析，显著水平 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 施氮、根间作用和密度对间作大麦豌豆吸氮量的影响

如表 1，施氮显著提高了间作大麦的吸氮量，相同密度和根间作用方式下，施氮处理在大麦苗期、分蘖期、抽穗期和成熟期吸氮量分别较不施氮处理提高 83.7%~175.8%、85.4%~146.2%、63.4%~109.6%和 46.3%~88.2%；根间互作利于提高间作大麦的吸氮量，相同施氮水平和密度下，隔根使间作大麦 4 个生育时期的吸氮量分别降低 16.4%~44.9%、46.1%~60.9%、56.1%~65.9%和 82.95%~128.14%，尤其在不施氮根间互作下大麦吸氮量比施氮处理隔根高 27.8%(2012 年)和 18.9%(2013 年)。增加密度时，间作大麦吸氮量显著增加，施氮和根间互作条件下使高密度大麦全生育期吸氮量较低密度处理分别提高 21.0%(2012 年)和 14.0%(2013 年)。

与间作大麦吸氮特征相似，施氮、根间互作和增加大麦密度均有利于间作豌豆吸氮量的增加。相同密度和根间作用下，施氮使间作豌豆吸氮量提高 4.79%~38.42%；根间互作使间作豌豆 4 个生育时期的吸氮量分别提高 4.4%~45.4%、37.7%~57.0%、37.2%~52.8%和 46.76%~104.23%，施氮根间互作下豌豆吸氮量比施氮处理隔根高 36.3%(2012 年)和 46.9%(2013 年)；在施氮及不隔根时，增加大麦种植密度使间作豌豆吸氮量分别提高 2.6%(2012 年)和 9.3%(2013 年)。

施氮、根间互作使间作群体吸氮量分别提高 20.3%~52.4%、61.16%~108.21%；根系分隔使间作群体吸氮量在不施氮、施氮条件下分别降低 48.0%和 42.2%，间作大麦吸氮量受影响程度高于豌豆，表明土壤氮素缺乏时根间互作是提高禾豆间作吸氮量的可行途径。氮素充分的条件下，增加大麦种植密度可提高间作群体吸氮量，增加大麦密度使不隔根间作群体吸氮量在施氮条件下提高 61.16%~81.92%，但不施氮条件下密度处理对间作群体吸氮量的影响不显著，表明人工补氮是间作密植提高吸氮量的必要条件。

施氮对大麦吸氮量的影响随生育期的推进逐渐减弱，而根间作用对大麦和豌豆的影响逐渐增强。根间作用、施氮水平和密度对大麦吸氮量的影响强

表 1　不同施氮、根间作用和密度处理下大麦||豌豆间作系统不同大麦生育时期植株吸氮量

Table 1　N uptake of the barley-pea intercropping system at different barley growth stages under different treatments of N application, root barrier and barley planting density　mg(N)·pot^{-1}

年份 Year	处理 Treatment	苗期 Seedling stage			分蘖期 Tillering stage			抽穗期 Heading stage			成熟期 Maturity stage		
		大麦 Barley	豌豆 Pea	间作系统 Intercropping system	大麦 Barley	豌豆 Pea	间作系统 Intercropping system	大麦 Barley	豌豆 Pea	间作系统 Intercropping system	大麦 Barley	豌豆 Pea	间作系统 Intercropping system
2012	N_0D_1	19.5±3.5ef	38.4±1.7bc	57.9±1.9d	99.5±13.6c	160.7±10.6a	260.2±22.1c	222.9±38.4cd	240.1±17.3a	463.0±27.2c	388.9±34.9c	658.0b±5.9c	1 046.9±28.9c
	N_0D_2	23.8±1.9de	29.7±1.7d	53.5±0.2d	105.1±7.3c	150.4±4.3a	255.5±3.4c	272.6±46.4c	230.5±56.7a	503.1±42.9c	412.0±39.6c	634.2±23.6c	1 046.2±36.2c
	N_0PD_1	14.7±2.9f	23.2±5.0e	37.9±3.3e	53.6±4.1d	89.7±5.7b	143.3±5.5e	92.7±11.9f	132.0±16.9b	224.8±27.1e	188.1±16.1e	399.8±11.9e	587.9±26.5e
	N_0PD_2	15.2±0.9f	18.5±3.9e	33.7±3.3e	55.1±10.9d	93.7±14.5b	148.8±5.6e	100.2±13.8ef	123.0±3.3b	223.2±12.3e	180.6±9.4e	393.6±33.2e	574.2±32.6e
	N_1D_1	40.1±8.1b	57.1±4.6a	97.2±3.5a	215.6±29.9b	164.6±5.5a	380.3±31.6b	370.3±46.5b	257.8±11.6a	628.1±45.6b	569.1±31.5b	690.6±25.9b	1 259.7±36.1b
	N_1D_2	48.3±2.6a	42.9±1.1b	91.1±2.1b	305.6±7.6a	170.6±9.9a	476.2±11.3a	480.6±66.9a	268.0±46.8a	748.5±34.4a	688.3±46.7a	754.4±53.5a	1 442.7±46.4a
	N_1PD_1	27.0±4.4cd	36.8±1.2c	63.8±3.3c	99.4±8.6c	82.3±3.2b	181.7±5.4d	160.3±7.8de	147.9±6.5b	308.2±5.5d	311.0±52.9d	470.6±27.5d	781.6±31.1d
	N_1PD_2	32.8±1.5c	30.4±1.4d	63.1±0.7c	119.4±19.1c	82.0±22.8b	201.3±8.0d	163.7±16.0de	132.6±10.0b	296.3±10.0d	315.7±5.0d	477.4±17.5d	793.1±21.5d
2013	N_0D_1	25.3±3.4e	69.3±2.3a	94.6±5.0bc	121.3±9.1d	220.2±10.4a	341.5±1.5d	209.6±37.0c	335.7±20.3a	545.3±18.8c	354.5±20.2c	691.5±28.8bc	1 045.9±26.9c
	N_0D_2	31.2±2.0d	59.8±4.3bc	91.0±4.7c	153.1±9.1c	207.8±23.5ab	360.9±20.5c	230.4±7.0c	328.0±12.9a	558.4±18.5c	376.6±28.8c	673.7±21.0c	1 050.3±32.3c
	N_0PD_1	16.2±0.5f	41.9±4.8f	58.1±4.3d	56.0±4.8e	103.0±11.3c	159.0±6.7f	77.7±10.8e	158.3±12.6c	236.0±4.8e	163.8±14.5e	338.6±11.4e	502.4±21.7e
	N_0PD_2	17.2±1.7f	32.7±6.4g	49.9±6.2e	62.2±5.5e	89.3±2.5c	151.5±5.0f	84.1±7.6e	157.7±8.9c	241.7±9.8e	171.8±14.1e	340.2±2.1e	512.6±15.5e
	N_1D_1	53.3±5.9b	65.5±3.7ab	118.8±5.9a	280.7±13.0b	189.1±18.9b	469.8±7.8b	371.4±17.3b	261.2±7.9b	632.6±14.6b	574.9±28.2b	724.5±29.4ab	1 299.4±10.2b
	N_1D_2	65.8±1.0a	51.4±2.9de	117.2±1.9a	325.1±19.1a	198.4±8.3ab	523.5±13.0a	463.4±26.9a	269.1±12.8b	732.6±22.1a	655.2±14.1a	743.5±18.3a	1 398.7±32.0a
	N_1PD_1	44.5±2.5c	57.8±1.1cd	102.3±1.6b	137.8±12.9cd	105.9±10.9c	243.7±9.5e	162.9±7.9d	163.9±8.0	326.8±5.7d	308.2±9.3d	457.6±22.5d	765.7±18.2d
	N_1PD_2	47.4±1.4c	49.1±0.4e	96.6±1.0bc	140.9±12.1cd	108.9±6.2c	249.8±5.9e	174.9±17.5d	154.4±8.3c	329.3±25.3d	306.7±7.6d	471.8±19.1d	778.5±17.3d
显著性检验 Significance due to:													
年际 Year		**	**	**	*	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
施氮 N application (N)		***	***	***	***	NS	***	***	NS	***	***	NS	***
密度 Planting density (D)		***	***	***	***	NS	***	***	NS	***	***	NS	***
根系分隔 Root barrier (B)		***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
施氮×密度 N × D		*	NS	NS	**	NS	***	*	NS	*	*	*	***
施氮×根系分隔 N × B		*	***	*	***	NS	***	***	*	***	***	*	***
密度×根系分隔 D × B		*	*	NS	***	NS	***	**	NS	***	**	NS	***
施氮×密度×根系分隔 N × D × B		NS	NS	NS	*	NS	**	*	NS	**	*	NS	**

N_0 和 N_1 分别代表不施氮和施氮；P 代表根系分隔；D_1 和 D_2 代表大麦低和高种植密度。各处理每年数据 3 次重复的平均值进行比较。同列不同字母表示差异显著。NS 表示不显著；***表示 $P<0.001$ 显著；**表示 $P<0.01$ 显著；*表示 $P<0.05$ 显著。N_0: no nitrogen applied; N_1: 100 mg(N)·kg^{-1} applied; P: root barrier; D_1: low barley planting density; D_2: high barley planting density. Values are means of three triplicates of one treatment in every year. Different letters within the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level. NS: not significant; ***: significant at $P < 0.001$ level; **: significant at $P < 0.01$ level; *: significant at $P < 0.05$ level.

于豌豆，说明各因素对间作群体吸氮量的影响主要是通过大麦组分来调控的。各因素对间作组分作物成熟期吸氮量的影响有显著的交互作用。

2.2 施氮、根间作用和密度对大麦相对于豌豆的氮素竞争比率动态的影响

如图1，大麦、豌豆苗期，不施氮条件下大麦相对于豌豆的氮素竞争比率小于0，大麦密度增加使豌豆氮素竞争比率降低86.3%，表明在氮素缺乏的共生初期豌豆是氮素竞争优势种，大麦密度增加能削弱豌豆的氮素竞争力。随生育期的推进，大麦相对于豌豆的氮素竞争比率明显增大，并成为氮素竞争优势种。至大麦抽穗期，氮素竞争优势达最大，不施氮和施氮条件下，高密度比低密度处理大麦相对豌豆的氮素竞争比率分别高29.0%和47.8%；低密度和高密度下，施氮较不施氮处理大麦相对于豌豆的氮素竞争比率分别高7.1%和23.0%，说明施氮和增加大麦密度可提高大麦在其生育时期的氮素竞争优势。比较全生育期大麦相对豌豆的平均氮素竞争比率，不施氮和施氮条件下，高密度比低密度处理大麦相对于豌豆的氮素竞争比率高99.7%和90.10%；低密度和高密度下，施氮较不施氮大麦相对于豌豆的氮素竞争比率高70.9%和73.2%。表明大麦密度增加增强了大麦的氮素竞争比率，施氮具有增强大麦氮素竞争优势的作用。

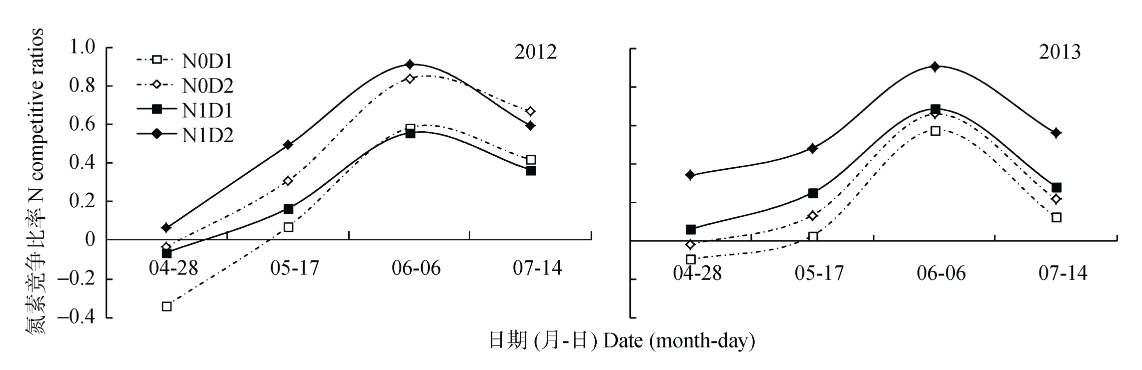


图1 大麦||豌豆间作系统不同处理下大麦相对于豌豆的氮素竞争比率

Fig. 1 Dynamics on N competitive ratios of barley to pea in the barley-pea intercropping system under different treatments

N_0和N_1分别代表不施氮和施氮；D_1和D_2代表大麦低和高种植密度。N_0: no nitrogen applied; N_1: 100 mg(N)·kg^{-1} applied; D_1: low barley planting density; D_2: high barley planting density.

2.3 施氮、根间作用和密度对大麦、豌豆籽粒氮含量和氮素收获指数的影响

2.3.1 不同处理下大麦、豌豆的籽粒氮含量

施氮与根间作用显著影响大麦||豌豆间作群体及组分作物的籽粒氮含量(表2)。就大麦籽粒氮含量而言，施氮较不施氮提高81.8%；与豌豆根间互作利于提高间作大麦籽粒氮含量，未隔根处理较隔根处理高144.8%。施氮水平和根间作用方式对其有极显著的交互作用，施氮条件下，未隔根较隔根高126.7%，不施氮条件下，未隔根较隔根高188.5%；密度和根间作用方式对大麦籽粒氮含量有显著的交互作用，未隔根时，高密度较低密度提高10.1%，隔根时，高密度较低密度降低6.3%。说明施氮降低了根系相互作用对大麦籽粒氮含量的正效应，根系相互作用增强了密度对大麦籽粒氮含量的正效应。

就豌豆籽粒氮含量而言，未隔根处理较隔根处理高34.5%，施氮较不施氮提高33.3%。虽然密度和根间作用方式对豌豆籽粒氮含量的作用不显著，但交互作用显著，未隔根时，高密度较低密度低8.4%，隔根时，高密度较低密度高4.5%，表明大麦与豌豆根间作用对豌豆籽粒氮含量具有一定的负效应。

施氮和根间作用条件下，间作群体籽粒氮含量分别较不施氮和隔根处理提高51.8%和71.5%。不施氮时，根系作用使间作群体籽粒氮含量提高84.5%，施氮时，根系作用使间作群体籽粒氮含量提高63.6%，与吸氮量相似，间作大麦籽粒氮含量受影响程度高于豌豆，表明土壤氮素缺乏时根间作用是提高禾豆间作群体籽粒氮含量的重要途径。

2.3.2 不同处理下大麦、豌豆的氮素收获指数

大麦、豌豆氮素收获指数见表2。比较氮素收获指数(NHI)，施氮使大麦、豌豆和间作NHI分别提高12.2%、14.0%和13.6%；根间互作使大麦NHI提高20.5%，使豌豆和间作群体的NHI分别降低23.3%和5.1%。密度和根间互作对豌豆NHI的交互效应显著，不隔根时增加大麦密度使豌豆NHI降低11.0%，但隔根条件下增加大麦密度使豌豆NHI增加4.0%。施氮、大麦密度和根间互作对大麦NHI的交互作用显著，根系相互作用处理下，不施氮时增加密度能提高大麦NHI 3.8%，而施氮时增加密度降低大麦NHI 8.2%。表明施氮能增加间作NHI，隔根能削弱密度增加对

表 2　大麦||豌豆间作系统不同处理下大麦、豌豆籽粒氮素含量及氮素收获指数

Table 2　Grain N contents and N harvest indexes of barley and pea in the barley-pea intercropping system under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒氮含量 Grain N content (mg·pot^{-1})			氮素收获指数 N harvest index (NHI)		
		大麦 Barley	豌豆 Pea	间作 Intercropping	大麦 Barley	豌豆 Pea	间作 Intercropping
2012	N_0D_1	300.2±19.7b	407.5±6.0ab	707.7±14.1b	0.775±0.04a	0.619±0.01b	0.676±0.05a
	N_0D_2	318.9±15.7b	352.0±9.4bc	670.9±16.8b	0.781±0.08a	0.555±0.02b	0.642±0.09a
	N_0PD_1	117.1±17.9d	247.2±6.1d	364.3±23.3c	0.620±0.06ab	0.618±0.02b	0.620±0.04a
	N_0PD_2	98.0±7.5d	277.7±46.4cd	375.6±45.3c	0.542±0.07b	0.702±0.06ab	0.653±0.04a
	N_1D_1	450.8±86.2a	475.1±87.5a	926.0±59.2a	0.800±0.04a	0.690±0.14ab	0.738±0.13a
	N_1D_2	513.9±53.9a	473.6±97.3a	987.5±43.6a	0.752±0.06ab	0.625±0.09b	0.685±0.08a
	N_1PD_1	219.4±8.0c	385.1±38.4ab	604.4±45.2b	0.721±0.02ab	0.817±0.03a	0.775±0.02a
	N_1PD_2	227.5±28.3c	372.8±53.3abc	600.4±73.0b	0.722±0.05ab	0.784±0.14a	0.759±0.16a
2013	N_0D_1	260.5±23.2bc	411.0±39.4b	672.1±26.3b	0.734±0.04bc	0.595±0.05de	0.643±0.04e
	N_0D_2	294.2±3.1b	357.5±21.3c	651.7±18.5b	0.785±0.08abc	0.531±0.00e	0.621±0.08e
	N_0PD_1	113.6±10.2e	251.6±10.1d	365.2±7.3d	0.697±0.06c	0.743±0.06ab	0.728±0.11bcd
	N_0PD_2	85.9±5.1e	273.7±23.8d	359.5±18.7d	0.504±0.07d	0.803±0.07a	0.701±0.00d
	N_1D_1	511.3±46.2a	506.6±27.0a	1 017.9±23.9a	0.888±0.04a	0.699±0.02bc	0.783±0.04ab
	N_1D_2	527.5±13.3a	466.1±24.8a	993.7±14.2a	0.806±0.06ab	0.627±0.05cd	0.711±0.04cd
	N_1PD_1	212.2±35.9d	369.3±45.8bc	581.5±11.3c	0.688±0.02c	0.807±0.03a	0.759±0.01abc
	N_1PD_2	224.9±11.4cd	388.1±23.3bc	612.9±29.6c	0.734±0.05bc	0.823±0.04a	0.788±0.09a
显著性检验 Significance due to:							
年际 Year		NS	NS	NS	NS	NS	NS
施氮 N application (N)		***	***	***	**	***	***
密度 Planting density (D)		NS	NS	NS	NS	NS	NS
根系分隔 Root barrier (B)		***	***	***	***	***	*
施氮×密度 N × D		NS	NS	NS	NS	NS	NS
施氮×根系分隔 N × B		***	NS	*	NS	NS	NS
密度×根系分隔 D × B		*	*	NS	NS	*	NS
施氮×密度×根系分隔 N × D × B		NS	NS	NS	*	NS	NS

N_0 和 N_1 分别代表不施氮和施氮；P 代表根系分隔；D_1 和 D_2 代表大麦低种植密度和高种植密度。显著性检验是分作物和年份进行；各处理每年数据 3 次重复的平均值进行比较。同列不同字母表示差异显著。NS 表示不显著；***表示 $P<0.001$ 显著；**表示 $P<0.01$ 显著；*表示 $P<0.05$ 显著。N_0: no N applied; N_1: 100 mg(N)·kg^{-1} applied; P: root barrier; D_1: low barley planting density; D_2: high barley planting density. The test of significance was performed on the same plant and year; Values are means of three triplicates of one treatment in every year. Different letters within the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level. NS: not significant; ***: significant at $P < 0.001$ level; **: significant at $P < 0.01$ level; *: significant at $P < 0.05$ level.

豌豆 NHI 的负效应，削弱根系相互作用时密度对大麦 NHI 的正效应，不施氮时根系相互作用增加了密度对大麦 NHI 的正效应，而施氮根间互作处理下密度升高会降低间作时氮素向大麦籽粒的运输比率。

2.4　氮素竞争比率与间作大麦、豌豆籽粒氮含量间的灰色关联度分析

为进一步说明氮素竞争比率与复合群体籽粒氮含量的相关程度大小，采用灰色关联度分析方法就不同生育时期大麦相对于豌豆的氮素竞争比率对间作各组分籽粒氮含量的影响程度大小进行了分析。灰色关联度分析[19]反映的是比较数列(氮素竞争比率)和参考数列(复合群体籽粒氮含量)间的密切程度，关联度越大，说明两者间变化的势态越接近，相互关系越密切。由表3可以看出，不同生育时期的氮素竞争比率对间作籽粒氮含量的关联度大小表现为：抽穗期>成熟期>分蘖期>苗期，抽穗期、成熟期和分蘖期的氮素竞争比率与间作籽粒氮含量的关联度比较高，说明抽穗期、成熟期和分蘖期的氮素竞争比率在不同施氮水平和密度处理条件下对间作各组分籽粒氮含量影响比较大。不同生育时期氮素竞争比率与大麦、豌豆和间作群体籽粒氮含量的相关分析显示(表4)，氮素竞争比率与大麦和间作籽粒氮含量呈正相关关系。适度调控两种作物共生期大麦的氮素竞争比率可提高间作籽粒氮含量，且大麦抽穗期、

表 3 大麦||豌豆间作系统大麦不同生育期氮素竞争比率与间作籽粒氮含量的关联度排序

Table 3 Degrees of association between seasonal N competitive ratio and grain nitrogen content of the barly-pea intercropping system at different barley growth stages under different treatments

处理 Treatment	间作作物籽粒氮含量 Grain nitrogen content of barly-pea intercropping (mg·pot^{-1})	氮素竞争比率 N competitive ratio			
		苗期 Seeding stage	分蘖期 Tillering stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage
N_0D_1	689.90	−0.22	0.05	0.58	0.27
N_0D_2	661.29	−0.03	0.22	0.75	0.44
N_1D_1	971.93	0.00	0.21	0.62	0.32
N_1D_2	990.58	0.20	0.49	0.91	0.58
关联度 Degree of association		0.611 2	0.961 1	0.987 4	0.978 1
排序 Ranking		4	3	1	2

N_0和N_1分别代表不施氮和施氮; D_1和D_2代表大麦低和高种植密度。N_0: no nitrogen applied; N_1: 100 mg(N)·kg^{-1} applied; D_1: low barley planting density; D_2: high barley planting density.

表 4 大麦豌豆共生期不同大麦生育时期氮素竞争比率与籽粒氮含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between seasonal N competitive ratio and grain nitrogen content in barly-pea intercropping systems under different barley growth stages

	生育时期 Growth stage				籽粒氮含量 Grain nitrogen content		
	苗期 Seeding	分蘖期 Tillering	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity	大麦 Barley	豌豆 Pea	间作 Intercropping
苗期 Seeding	1	0.649**	0.531**	0.502*	0.371	−0.059	0.224
分蘖期 Tillering		1	0.360	0.525**	0.499*	−0.062	0.310
抽穗期 Heading			1	0.635*	0.091		−0.052
成熟期 Maturity				1	0.250	−0.189	0.090

成熟期和分蘖期可作为通过间作作物种间氮素竞争比率调控而获得较高籽粒氮含量的关键管理期。

2.5 根间作用和密度对大麦||豌豆间作氮肥利用率的影响

间作群体氮肥利用率(NUE)见图2。密度和根间作用方式对间作群体NUE有极显著的影响，且密度和根间作用方式对间作群体NUE的影响有极显著的交互作用。密度增加能提高间作群体NUE 33.1%，根间作用能提高间作群体NUE 28.6%，尤其在根间作用时增加大麦密度能显著提高间作群体NUE 59.8%，说明根系相互作用可增强大麦密植对间作群体氮肥利用率的正效应。

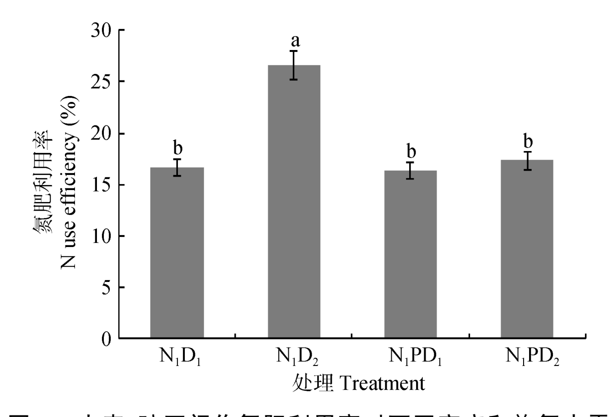


图 2 大麦||豌豆间作氮肥利用率对不同密度和施氮水平的响应

Fig. 2 Response of N use efficiency of barly-pea intercropping to different treatments of barley planting densities and nitrogen application

N_1代表施氮; P代表根系分隔; D_1和D_2代表大麦低和高种植密度。N_1: 100 mg(N)·kg^{-1} applied; P: root barrier; D_1: low barley planting density; D_2: high barley planting density.

在大麦豌豆共生期内，间作群体氮素竞争比率与氮肥利用率呈正相关关系。苗期氮素竞争比率与间作群体氮肥利用率的相关系数为 0.592*，分蘖期为 0.797**，抽穗期为 0.764**，成熟期为 0.324。在大麦分蘖期、抽穗期和苗期，通过密度、施氮水平和根间作用方式等农艺措施的调整来提高氮素竞争比率，能有效提高间作群体的氮肥利用率。

3 讨论

3.1 种植密度对作物氮素利用的影响

间作作物的密度配比对作物的氮素利用效率、氮素竞争力都有影响。朱元刚等[15]对玉米||大豆(*Glycine max* L.)间作群体的研究认为，玉米与豆类间作，竞争的主要因子是光、养分和水分。当土壤水分、养分得到满足后，玉米||大豆间作优势主要来自密度效应。有研究表明，适当增加密度有利于产量提高，并可显著提高氮素利用效率[20]。本试验中，在根间作用和密度的交互作用下，高密度处理使大麦和豌豆吸氮量、间作氮肥利用率均显著提高。但

是通过主效应分析发现, 密度处理对大麦和豌豆籽粒氮含量的影响并不显著, 而隔根处理与密度的交互作用显著, 不隔根高密度处理大麦籽粒氮含量显著高于低密度处理, 说明大麦和豌豆间作中密植提高作物籽粒含氮量与组分作物根间互作有很大关系。并且在不隔根处理中, 大麦对施氮水平、密度和根间关系的变化更为敏感, 说明大麦||豌豆间作系统中, 间作吸氮量和氮肥利用率的提高优势归因于大麦与豌豆根系在空间上的重叠和水分、养分在根际间的交流。密度增加使大麦的根系和冠层量显著增加, 特别是根长密度增加比例显著升高, 对氮素吸收明显增加, 不仅满足了地上部群体增大后的氮素需求, 并且通过对间作豌豆生物固氮的刺激[21], 使施氮后间作群体平均吸氮量提高 7.5%, 根间作用下间作吸氮量的增加更为显著, 达 11.0%。密度对单作和间作群体作物的影响不同, 在刘斌等[22]对甜瓜(*Cucumis melo* L.)||向日葵(*Helianthus annuus* L.)间作系统的研究中, 高、中、低密度下, 甜瓜单作时高密度吸氮量和氮肥偏生产力最大, 而间作甜瓜因不同间作播期, 最大吸氮量和氮肥偏生产力出现在不同密度; 张金汕等[23]对大麦氮素吸收的研究中, 最大吸氮量和氮肥表观利用效率出现在试验设定的中密度处理下。本试验只设定了 2 个大麦种植密度, 施氮条件下高密度时, 间作吸氮量和氮肥利用效率高于低密度, 但如果增加密度梯度或者拓宽种植密度上下限, 大麦||豌豆间作吸氮量和氮肥利用效率可能有不同的表现, 即在间作种植模式组成作物根间互作的影响下通过密植提高氮素利用率必然存在一定的界限, 还需进一步研究。

3.2　根间作用与间作氮素利用的关系

间作作物因共同利用空间和各种资源而发生竞争, 但也由于间作组成作物对群体微环境的改变, 使资源的可利用性增加而产生互补。竞争和互补关系同时存在, 两者的相对大小及其重要性随作物的生长发育进程而改变[24-25]。以往的研究发现种间的竞争能力尤其是对氮素的竞争能力与根系生长、分布和根间作用方式有关, 并且各组分对养分的吸收和利用能力不同, 往往是一种作物养分吸收和利用能力的增强是以降低另一种作物对养分吸收和利用能力作为代价的[26], 一般禾谷类作物根系活力高于豆科[27]。在肖焱波等[1,3]小麦(*Triticum aestivum* L.)||蚕豆(*Vicia faba* L.)的研究中, 由于种间根系相互作用的影响, 小麦的竞争作用增加了间作蚕豆共生固氮, 因固氮而“节约的氮”供小麦吸收利用。本研究中, 大麦为氮素竞争优势种, 这与已有的研究结果一致[1,27]。施氮条件下, 根系相互作用对大麦和豌豆吸氮量的贡献率为 106.6%和 66.3%, 对籽粒氮含量贡献率分别为 144.7%和 34.5%, 由于大麦对氮素较强的竞争能力, 根间作用对豌豆的贡献较弱。同时, 不隔根处理下, 密植和施氮显著提高了大麦相对于豌豆对氮素的竞争比率。虽然密度增大会增加种间氮素竞争比率, 但在施氮时总体表现为促进作用强于竞争[28-29]。而本试验设定的大麦||豌豆间作群体总体表现为间作优势, 说明根间作用是平衡间作两种作物种间氮素竞争与互补关系的主要途径, 通过密植调控禾本科作物与豆科作物根间相互作用, 从而促进间作群体对土壤氮素的利用, 可以降低对氮肥的依赖, 尤其在土壤氮素水平较低时, 通过根间作用能弥补禾豆间作因土壤氮素缺乏造成的氮素吸收下降。

3.3　施氮、根间互作与密度处理对间作作物氮素利用的协同作用

周江明等[30]在单作小麦的研究中指出, 小麦籽粒产量在氮肥水平和种植密度合理搭配的条件下才能极显著地提高。单作条件下, 氮素对籽粒产量的调节效应和群体条件密切相关, 低氮水平下适当增加种植密度可提高籽粒产量, 高氮水平下却表现出相反趋势[31]。在不同种植密度和氮肥处理组合研究中指出, 密度过大或过小都不利于高产群体形成, 而中密度高氮肥和高密度中氮肥处理由于调节补偿作用可获得较高产量[32]。种植密度和氮肥水平互作对冬小麦产量和氮素利用率的调控效应研究表明, 适当降低氮肥用量和增加种植密度同样可以获得较高的籽粒产量和氮素利用效率[33]。由于根间互作的影响, 间作条件下种植密度与氮肥对作物氮素利用的协同效应更加复杂, 本试验中根间作用在不施氮条件下使间作群体吸氮量和籽粒氮含量提高 34.3%和 12.6%, 而且不施氮根间作用下密度增加对大麦吸氮量和籽粒氮含量贡献率达 5.9%和 6.2%, 证明通过根间作用的氮营养互补利用弥补了不施氮肥导致的大麦吸氮量和籽粒氮含量的减少, 密度增加可增强大麦的氮素吸收和向籽粒转移的能力, 从而在较低土壤氮水平上获得较高的籽粒氮含量。其次, 通过根间作用, 间作大麦能消减豌豆的“氮阻遏”并刺激豌豆根瘤的生长, 提高豌豆固氮能力, 而间作条件下豆科作物固氮量增大, 并且对禾本科氮素的转移量增多[1], 就能有效节约土壤中的氮素。本试验中根间作用使豌豆吸氮量和籽粒含氮量均有提高, 并

且不施氮处理吸氮量和籽粒氮含量的提高比例大于施氮处理。这是因为生态系统中资源缺乏时，相互作用的物种间生态位宽度增加，使得单位资源的边际报酬达到最大化[3]。灰色关联分析结果显示，不同生育时期的氮素竞争比率对大麦、豌豆和间作籽粒氮含量的关联度大小表现为：抽穗期>成熟期>分蘖期>苗期。因此，在生产中可以考虑在禾豆间作不同生育时期，通过种植密度、施氮水平、不同生育时期的施氮配比等措施调控复合群体根系空间布局和形态，充分利用根际间的补偿效应来提高地下根系相互作用的贡献，使间作作物在氮素资源的需求上具有互补性，种间的互利作用大于竞争，最大化发挥间作群体对氮素的吸收和利用，从而提高间作氮肥利用率，减少生产氮肥和施氮对环境的污染。

4 结论

大麦||豌豆间作系统中，大麦是氮素竞争优势种，并且各因素对间作群体吸氮量的影响主要通过大麦的变化来调控；大麦抽穗期氮素竞争比率与间作籽粒氮含量的关联度最高，且抽穗期氮素竞争优势最大。施氮和根间互作条件下，高密度大麦可显著提高间作群体的氮肥利用效率，根间互作条件下增加大麦密度使间作群体氮肥利用效率提高59.8%；密植能够提高大麦相对于豌豆的氮素竞争比率，而大麦相对于豌豆的氮素竞争比率与间作群体氮肥利用率呈显著的正相关关系。本研究表明，适宜的施氮量和充分的根间作用是支撑间作密植的重要条件，也是优化间作中大麦、豌豆氮素竞争比率并提高间作群体吸氮量和氮肥利用效率的重要途径。在充足的氮肥条件下，通过大麦种植密度能够有效调控间作体系中与豌豆根间相互作用，协调种间对土壤氮素的竞争关系，即禾本科作物合理密植能够达到优化组分作物根间相互作用、氮素的竞争关系，从而达到禾豆间作氮素高效利用的目的。

参考文献 References

[1] 肖焱波，李隆，张福锁．小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究[J]．中国农业科学, 2005, 38(5): 965–973
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5): 965–973

[2] 肖焱波，李隆，张福锁．根瘤菌菌株NM353对小麦/蚕豆间作体系中作物生长及养分吸收的影响[J]．植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 89–96
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The enhancement of growth and nutrients uptake by crops with inoculating rhizobium strain NM353 in wheat and faba bean intercropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 89–96

[3] 肖焱波，段宗颜，金航，等．小麦/蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]．植物营养与肥料学报，2007，13(2): 267–271
Xiao Y B, Duan Z Y, Jin H, et al. Spared N response and yields advantage of intercropped wheat and fababean[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 267–271

[4] 雍太文，杨文钰，向达兵，等．小麦/玉米/大豆套作的产量、氮营养表现及其种间竞争力的评定[J]．草业学报, 2012, 21(1): 50–58
Yong T W, Yang W Y, Xiang D B, et al. Production and N nutrient performance of wheat-maize-soybean relay strip intercropping system and evaluation of interspecies competition[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(1): 50–58

[5] 肖靖秀，汤利，郑毅，等．大麦/蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响[J]．麦类作物学报, 2011, 31(3): 499–503
Xiao J X, Tang L, Zheng Y, et al. Effects of N level on yield of crops, N absorption and accumulation of barley in barley and faba bean intercropping system[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(3): 499–503

[6] Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, et al. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N_2-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 64–71

[7] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 221–231

[8] 肖焱波，李隆，张福锁．豆科/禾本科间作系统中氮营养研究进展[J]．中国农业科技导报, 2003, 5(6): 44–49
Xiao Y B, Li L, Zhang F S. An outlook of the complementary nitrogen nutrition in the legume/graminaceae system[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2003, 5(6): 44–49

[9] 李玉英，余常兵，孙建好，等．蚕豆玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]．农业工程学报, 2008, 24(3): 223–227
Li Y Y, Yu C B, Sun J H, et al. Nitrogen environmental endurance and economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer in faba bean/maize intercropping system[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 223–227

[10] Ahlawat A, Jain V, Nainawatee H S. Effect of low temperature and Rh izospheric application of naringenin on pea-rhizobium *leguminosarum* biovar *viciae* symbiosis[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 1998, 7(1): 35–38

[11] 焦念元，宁堂原，赵春，等．施氮量和玉米-花生间作模式对氮磷吸收与利用的影响[J]．作物学报，2008，34(4): 706–712

Jiao N Y, Ning T Y, Zhao C, et al. Effect of nitrogen application and planting pattern on N and P absorption and use in maize-peanut intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 706–712
[12] Palta J A, Fillery L R P, Rebetzke G J. Restricted-tillering wheat does not lead to greater investment in roots and early nitrogen uptake[J]. Field Crops Research, 2007, 104(1/3): 52–59
[13] 朱静. 玉米密度对间作豌豆“氮阻遏”的调控效应及机制[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012: 6–10, 44–51
Zhu J. The controlling effect and mechanism of maize density on the intercropping peas “N min inhibitory effect”[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012: 6–10, 44–51
[14] Neumann A, Werner J, Rauber R. Evaluation of yield-density relationships and optimization of intercrop compositions of field-grown pea-oat intercrops using the replacement series and the response surface design[J]. Field Crops Research, 2009, 114(2): 286–294
[15] 朱元刚, 高凤菊, 曹鹏鹏, 等. 种植密度对玉米-大豆间作群体产量和经济产值的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1751–1758
Zhu Y G, Gao F J, Cao P P, et al. Effect of plant density on population yield and economic output value in maize-soybean intercropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1751–1758
[16] 罗照霞, 柴强. 不同供水水平下间甲酚和间作对小麦、蚕豆耗水特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1478–1482
Luo Z X, Chai Q. Effect of 3-methyl phenol at different rates of irrigation and intercropping on water consumption, and yield of wheat and faba-bean[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(6): 1478–1482
[17] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: Ⅰ. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Research, 2001, 71(2): 123–137
[18] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1122–1128
Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1122–1128
[19] 施伟, 昌小平, 景蕊莲. 不同水分条件下小麦生理性状与产量的灰色关联度分析[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 653–659
Shi W, Chang X P, Jing R L. Gray association grade analysis of physiological traits with yield of wheat under different water regimes[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(4): 653–659
[20] 甘银波, 本佳婉. 不同氮肥管理对毛豆共生固氮及产量的影响[J]. 中国油料, 1996, 18(1): 34–37
Gan Y B, Ben J W. Effects of N fertilizer managements on N fixation and yield of two vegetable soybeans[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1996, 18(1): 34–37
[21] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(3): 289–300
[22] 刘斌, 谢飞, 凌一波, 等. 不同间作播期和密度对甜瓜/向日葵间作系统氮素利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 36–46
Liu B, Xie F, Ling Y B, et al. Effects of intercropping time and planting density on nitrogen use efficiency of melon-sunflower intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1): 36–46
[23] 张金汕, 董庆国, 方伏荣, 等. 密度和施氮量对啤酒大麦氮素吸收利用及籽粒蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 371–378
Zhang J S, Dong Q G, Fang F R, et al. Effect of density and N fertilizer on nitrogen uptake and protein content of beer barley[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(3): 371–378
[24] 齐万海, 柴强. 不同隔根方式下间作小麦玉米的竞争力及产量响应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 31–34
Qi W H, Chai Q. Yield response to wheat/maize competitiveness in wheat/maize intercropping system under different root partition patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 31–34
[25] 殷文, 赵财, 于爱忠, 等. 秸秆还田后少耕对小麦/玉米间作系统中种间竞争和互补的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(4): 633–641
Yin W, Zhao C, Yu A Z, et al. Effect of straw returning and reduced tillage on interspecific competition and complementation in wheat/maize intercropping system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(4): 633–641
[26] 董宛麟, 于洋, 张立祯, 等. 向日葵和马铃薯间作条件下氮素的吸收和利用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 98–108
Dong W L, Yu Y, Zhang L Z, et al. Nitrogen uptake and utilization in sunflower and potato intercropping[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(7): 98–108
[27] 朱树秀, 季良, 阿米娜. 玉米单作及与大豆混作中氮来源的研究[J]. 西北农业学报, 1994, 3(1): 59–61
Zhu S X, Ji L, A M N. N resource of corn plants in monoculture and mixture[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1994, 3(1): 59–61
[28] Vandermeer J H. Intercropping[M]//Carroll C R, Vandermeer J H, Rosset P M. Agroecology. New York: McGraw-Hill, 1990: 481–516
[29] Ofori F, Stern W R. Cereal-legume intercropping systems[J]. Advances in Agronomy, 1987, 41: 41–90
[30] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274–281
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, et al. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 274–281
[31] 程晟, 刘晋荣. 简析氮素营养对超高产小麦的调控[J]. 山

西农业科学, 2011, 39(3): 291–294
Cheng S, Liu J R. Primary analysis of nitrogen nutrient control of super-high-yield wheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 291–294
[32] 杨学明, 姚金保, 姚国才, 等. 不同密度及氮肥运筹对宁麦 9 号产量和群体质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2002(5): 11–13
Yang X M, Yao J B, Yao G C, et al. Effects of density and nitrogen application on the grain yield and population quality of wheat variety Ningmai 9[J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 2002(5): 11–13
[33] 张娟. 种植密度和氮肥水平互作对冬小麦产量和氮素利用率的调控效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014
Zhang J. Combined effect of plant density and nitrogen level on grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014